

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.10.004

四种排水管道健康评估方法对比与分析

王万琼¹, 刘彤^{2,3}, 林沛元^{2,3}, 彭寿海¹, 陈晓龙¹, 米荣熙¹,
王福芝¹, 马保松^{2,3}

(1. 中国长江三峡集团有限公司 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 2. 中山大学 土木工程学院, 广东 广州 510275; 3. 中山大学 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 为提升排水管网管理与维护的科学性和精准性,基于长江流域某城市排水管网的缺陷检测数据,对中国、英国及北美地区的3种主流评估方法,以及自主构建的双指标体系进行了系统对比分析,研究了数值分布特征、阈值划分差异、指标相关性及等级分布与映射,分别量化了4种方法在结构性与功能性缺陷评估上的表现。结果表明,4种方法在取值范围、计算逻辑和等级设定上存在显著差异,应依据实际工程需求、管理目标和应用场景合理选择,以保证评估结果的有效性和适用性;自主构建的双指标体系能够提供连续、可扩展的量化结果,兼顾短期运维与长期资产管理的决策需求。研究成果可为排水管网状况评估标准的更新与优化提供科学依据。

关键词: 排水管道; 状况评估; 结构性缺陷; 功能性缺陷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)10-0022-09

Comparison and Analysis of Four Drainage Pipeline Health Assessment Methods

WANG Wanqiong¹, LIU Tong^{2,3}, LIN Peiyuan^{2,3}, PENG Shouhai¹, CHEN Xiaolong¹,
MI Rongxi¹, WANG Fuzhi¹, MA Baosong^{2,3}

(1. National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. State Key Laboratory for Tunnel Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: To enhance the scientific rigor and precision of drainage pipeline network management and maintenance, defect inspection data from a representative city in the Yangtze River basin were used to conduct a systematic comparative analysis of three mainstream assessment methods from China, the United Kingdom, and North America, along with a self-developed dual-indicator system. The study examined numerical distribution characteristics, threshold division differences, indicator correlations, as well as the distribution and mapping of assessment grades, quantitatively comparing the performance of the four methods in assessing structural and functional defects. The results indicate that the four methods differ significantly in value ranges, calculation logic, and grade settings, and that therefore their selection should be carefully aligned with specific engineering needs, management objectives, and application

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203200); 中国长江三峡集团科技项目(WWKY-2020-0593); 广东省“珠江人才计划”引进创新创业团队项目(2021ZT09G087); 中山大学研究生学术创新项目(76140-12253018)

通信作者: 林沛元 E-mail: linpy23@mail.sysu.edu.cn

scenarios to ensure the effectiveness and applicability of the assessment results. The self-developed dual-indicator system can provide continuous and extendable quantitative outputs, thereby supporting decision-making for both short-term maintenance and long-term asset management. The findings can offer scientific evidence to inform the updating and optimization of drainage pipeline network condition assessment standards.

Keywords: drainage pipeline; condition assessment; structural defects; functional defects

城市排水管网是现代社会运行中最为重要的基础设施之一,其隐蔽性和长期服役特征使得缺陷难以及早发现^[1]。一旦管道发生破坏或失效,往往会导致城市内涝、道路塌陷、污水溢流及环境污染等问题,甚至危及居民生活质量与公共安全。研究^[2]表明,排水管网老化问题在全球范围内日益突出,裂缝、破损、变形及错口等结构性缺陷广泛存在,伴随功能性缺陷的累积,严重削弱了排水系统的服务能力。为实现有计划的养护与修复,亟须通过系统检测与准确评估,将地下管网的隐性状态转化为可量化、可决策的信息,这也推动了各国不断发展并完善排水管道健康评估方法,以支撑系统化运维与资产管理实践。

自我国发布《城镇排水管道检测与评估技术规范》(CJJ 181—2012)以来,该规程在全国范围内得到广泛应用,有力推动了排水管网健康评估工作的进展。然而,经过10余年的工程实践,该规程在应用中逐渐暴露出其局限性,部分评估结果与实际状况存在偏差。近期,国家标准化管理委员会已立项启动评估标准更新工作,旨在提高评估体系的科学性与可靠性。与此同时,国际上部分国家和地区也相继形成了多种排水管道评估方法,如英国、北美、新西兰、日本等均编制了相应技术规程,广泛用于指导管网运维管理。值得注意的是,这些方法在计算逻辑、数据处理和结果表达上存在明显差异,导致同一管段在不同方法下的评估结果可能显著不同^[3],增加了管理和决策的难度和不确定性。因此,系统比较国内外主要评估方法,梳理差异来源与适用性特征,对推动标准更新与方法优化具有重要意义。

基于此,以长江流域某市中心城区管网系统的检测数据为基础,选取英国水研究中心(WRC)^[4]、美国管道评估和认证计划(PACP)^[5]、我国CJJ 181—2012提出的3种主流方法,并引入自主构建的双指

标体系进行对比分析。通过数值分布特征、阈值划分差异、指标相关性及等级分布与映射,全面揭示4种方法在取值范围、计算逻辑和等级设定上的异同,明确其不同工程情境下的适用性与局限性。研究成果可为我国排水管网评估标准的更新提供实证参考,并为地方管理部门在方法选用、养护规划及资产管理决策中提供依据。

1 4种排水管道健康评估方法概述

1.1 中国城市排水管道缺陷评估标准

CJJ 181—2012是我国首部系统化的排水管道缺陷评估标准。该规程的核心目标是通过统一的缺陷分类以及评分体系,对管道结构性和功能性缺陷进行量化评价,并据此科学、合理地确定维修与养护优先级。

该规程为每类管道缺陷设定了不同等级的扣分标准,评分规则主要基于专家经验,并以缺陷累计得分表征管道的劣化状况。其中,修复指数(RI)用于衡量结构性缺陷程度,养护指数(MI)则用于衡量功能性缺陷程度。

管段结构性缺陷参数 F 采用最大缺陷值与平均缺陷值结合的方式综合评定,其计算公式为:

$$F = \begin{cases} S_{\max} & S_{\max} \geq S \\ S & S_{\max} < S \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为管段结构性缺陷中最严重处的分值; S 为基于缺陷点数的平均分。

在此基础上计算RI,用于反映结构性缺陷的整体状况,具体见下式:

$$RI = 0.7F + 0.1K + 0.05E + 0.15T \quad (2)$$

式中: K 为地区重要性参数; E 为管道重要性参数; T 为土质影响参数。具体取值方法见CJJ 181—2012。

管段功能性缺陷参数 G 的计算逻辑与 F 相似,在此基础上计算MI,具体见下式:

$$MI = 0.8G + 0.15K + 0.05E \quad (3)$$

根据RI和MI的计算结果,将管道状况按照修复等级和养护等级划分为1~4级,其中1级表示轻微缺陷,4级表示重大缺陷。尽管CJJ 181—2012在我国排水管道检测与管理中得到广泛应用,其多因子加权计算在一定程度上纳入区域重要性、土质条件等信息,提升了评估的综合性,然而,该方法的加权逻辑缺乏明确的理论依据,相关公式的物理解释性有限,导致评分呈阶梯式变化,可能会限制其在趋势预警和渐进治理中的适用性。

1.2 英国排水管道评估标准

《排水管道状况分类手册》(第4版)由英国WRC于2004年发布,是在1980年首版基础上进行的第4次修订。该手册是最早形成的排水管道状况评估体系之一,对后续多个国家和地区的评估方法制定具有重要的参考作用。该体系通过系统化的编码方法为不同类型缺陷设定扣分值,并以最高缺陷评分决定管段结构等级,即最大缺陷驱动机制。这种方法突出了对严重缺陷的识别,能够确保高风险点不会被低估,从而为紧急修复决策提供有力支持。然而,其评估结果往往由单一最严重缺陷主导,容易忽略多个中低等级缺陷累积造成的整体性退化风险,导致管网实际状况被简化为局部极值的反映。根据最高缺陷得分,WRC将管段划分为5个等级(1~5),其中1级表示几乎无缺陷,5级表示存在严重缺陷、需立即修复。

1.3 北美公共管网评估体系

PACP由美国全国下水道服务公司协会(NASSCO)在英国WRC的协助下于2004年建立,是北美地区最具代表性的排水管道状况评估体系。PACP在WRC体系的基础上,从结构缺陷、功能缺陷及外部因素等角度设计了新的编码方法。其编码系统分为结构缺陷、运行与维护缺陷、施工特征和其他特征等4大类,编码通常由2~3部分构成:第1部分标示缺陷类别,第2部分说明缺陷的方向与位置,第3部分(如有)则量化缺陷的严重程度。

PACP为每类缺陷设定了1~5级的评分,并采用所有缺陷的平均等级来表征管道的整体健康状况。这一基于平均值逻辑的方法在多缺陷并存时容易产生“稀释效应”:当管道同时存在少量高等级缺陷与大量低等级缺陷时,最终评分会被拉低,从而掩盖严重缺陷对结构安全的真实威胁。这可能导致高风险管段的缺陷程度被低估,进而延误关键的修

复决策。

1.4 自主构建的排水管道健康状态双指标体系

排水系统的健康状态评估是一项多尺度、多维度的综合性任务,需全面考虑结构性与功能性缺陷特征、管道重要性、劣化程度与面积等物理量。为同时支撑短期运维与长期资产管理需求,本研究构建了一套物理基础明确、连续可量化的健康评估双指标体系。

该体系的核心设计以统一数学结构与连续性特征为基础,支持多缺陷集成建模,并赋予评估结果以工程可解释性。其突破传统分级评估方法在表达精度与逻辑一致性上的局限,通过统一的公式结构实现结构性与功能性缺陷量化的同源表达,为趋势分析与状态判断奠定基础。

假设管段检测出的缺陷集合为 $\{D_k | k = 1, 2, \dots, n\}$,则管道健康状态的通用指标表达式为:

$$I = f(S_k, d_k, A, I_p) \quad (4)$$

式中: I 为计算得到的健康状态指标,可具体化为管道维修指标(PMI)或管道状况指标(PCI); S_k 为缺陷 D_k 的等级(如1, 2, 3, 4, 5); d_k 为缺陷 D_k 的面积; A 为对应管段的总表面积或截面积; I_p 为管道的重要性参数,可根据具体场景,综合考虑管道直径、管段长度、服务区域范围或所在区域重要性等因素确定。

基于 I 的定义,提出了2个用于管道状况评估的指标。第1个是PMI,强调局部严重性和紧急修复需求,适用于短期运维的优先级排序,定义为:

$$PMI = \sum_{k=1}^n S_k I_p \quad (5)$$

第2个是PCI,其为综合性状态指标,用于反映管段的整体劣化状况,适用于横向对比、时间序列跟踪和资产管理,定义为:

$$PCI = \sum_{k=1}^n \frac{S_k d_k}{A} \quad (6)$$

这一设计提供了灵活的适用性,可兼容不同的养护策略。当短期与长期养护职责由不同部门承担时,PMI和PCI可独立使用:例如PMI用于日常养护和应急响应的优先级排序,PCI用于全面健康评估与更新规划。若职责统一,仅使用PCI亦可支持综合性策略的制定。

实际应用中,结构性和功能性缺陷水平在该框

架下分别计算,从而实现两类缺陷的精细化评估,同时可保持指标的逻辑一致性。该体系的构建逻辑基于缺陷本体的物理量化: S_k 表示缺陷的严重性, d_k 体现缺陷的损伤规模, A 提供统一的空间尺度, I_p 则将管道在网络中的功能权重纳入计算。以上参数均可直接测得或派生,使评估结果可追溯且具有工程意义。公式采用连续加权结构,可有效避免传统方法最大值锁定或均值稀释导致的偏差,并保证指标随缺陷累积呈平滑响应,而非阶梯式跳变,为后续基于时间序列的劣化分析和趋势判断提供支撑。

2 排水管道健康状态评价结果的综合分析

本研究基于长江流域某市中心城区排水管网的检测数据,覆盖管道总长439.14 km,共4362条管段。检测内容包含结构性缺陷与功能性缺陷两大类病害,数据来自系统的闭路电视及声呐检测结果。依据以上原始缺陷信息,分别采用CJJ 181—2012、WRC、PACP以及自主构建的双指标体系,对全域排水管道进行健康状态评估。

在PACP体系下,结构性与功能性缺陷评分的累积分布特征见图1。

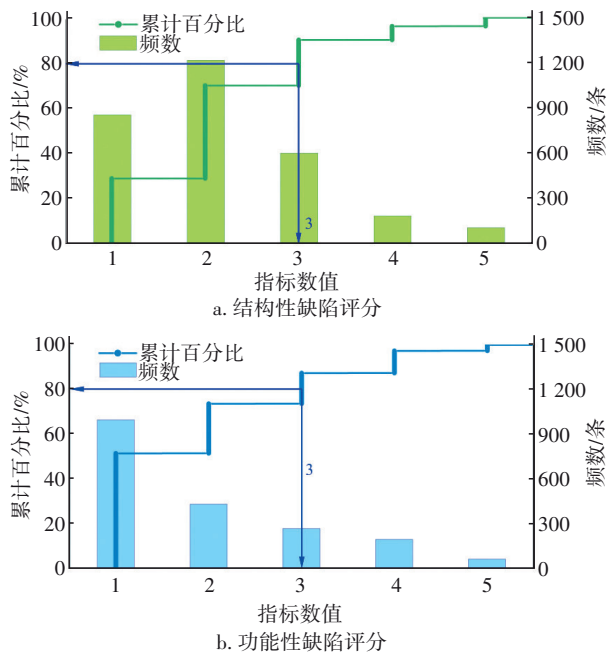


图1 PACP体系两种缺陷评分的累积分布特征

Fig.1 Cumulative distribution characteristics of two types of defect ratings under PACP system

由图1可知,80%的管段在两类缺陷评估中集中在1~3级。PACP体系结构性缺陷评分的2级占

比最高,表明该方法评估下结构性缺陷以轻度和中度病害为主,如接口轻微错位或局部裂缝;而4~5级占比显著偏低,说明严重结构损伤在整体样本中并不普遍。相比之下,PACP体系功能性缺陷评分的分布更偏向低分段,1级占比约51%,显示大部分管段功能状态良好,仅存在轻微运行或维护问题。值得注意的是,PACP体系以平均值作为等级判定逻辑,导致评估结果分布呈现“中间聚集”趋势,而高等级缺陷的影响在统计上被稀释。这种“均值效应”虽保证了管网整体状态的平滑表征,但却可能低估个别高风险点的紧急性。

图2展示了WRC体系下排水管道评估的总体分布特征。

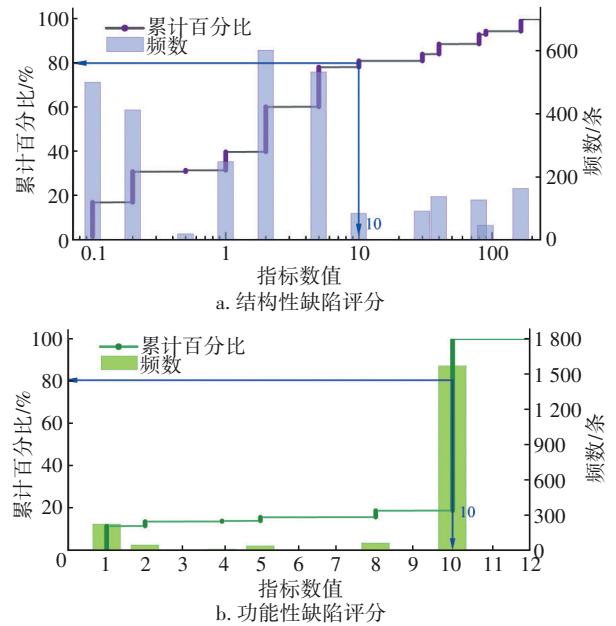


图2 WRC体系两种缺陷评分的累积分布特征

Fig.2 Cumulative distribution characteristics of two types of defect ratings under WRC system

由图2可知,结构性缺陷评分在对数坐标下分布较为均匀,极小值和极大值均占有一定比例。虽然80%的管段评分集中于0.1~10,但仍有约20%的管段评分介于10~165,说明少数极端缺陷被直接赋予高分,从而显著拉高整体评分。绝大多数管段集中于中低分值区域,而高分值主要由少数严重病害锁定。功能性缺陷评分分布呈现出极端集中的特征,大多数管段评分集中于固定值10,这与当前WRC体系等级划分中对障碍物缺陷设定统一评分的规则有关。由于本案例中管段内障碍物类缺陷占比较高,评分缺乏区分度,多条实际存在差异的

管段呈现相同评分。数据显示,超过 80% 的管段直接被评为 10 分,呈单值集聚现象。相比 PACP 体系的均值逻辑, WRC 体系的极值机制强化了对高风险缺陷的识别,但同时也掩盖了中低等级缺陷的数量信息,难以反映管网系统性的退化趋势。因此, WRC 评分体系在保障极端病害优先治理上具有优势,但在描述管网整体状态方面存在明显局限。

图 3 展示了 CJJ 181—2012 体系下结构性缺陷 RI 与功能性缺陷 MI 的累积分布特征。可知, RI 在 0~3 区间高度集中,约 80% 的管段评分低于 4.5,表明该方法评估下大部分结构性缺陷处于轻~中度水平;评分高于 7 的管段数量较少,累积曲线在数值 8 上出现明显跳跃,反映出少数高权重缺陷可能对整体评分产生拉动效应。MI 的分布同样表现出集中性:5.5 以下覆盖了 80% 的管段,但在 9~10 区间再次出现较高占比。RI 与 MI 均采用分段加权法,导致评分呈明显的跳跃式增长特征:在部分分段曲线平缓累积,一旦权重因子叠加,分值骤然上升。该方法有助于标识突出的修复或养护需求,但也降低了对渐进式劣化趋势的敏感性,可能限制其在连续状态监测和动态预警中的应用效果。

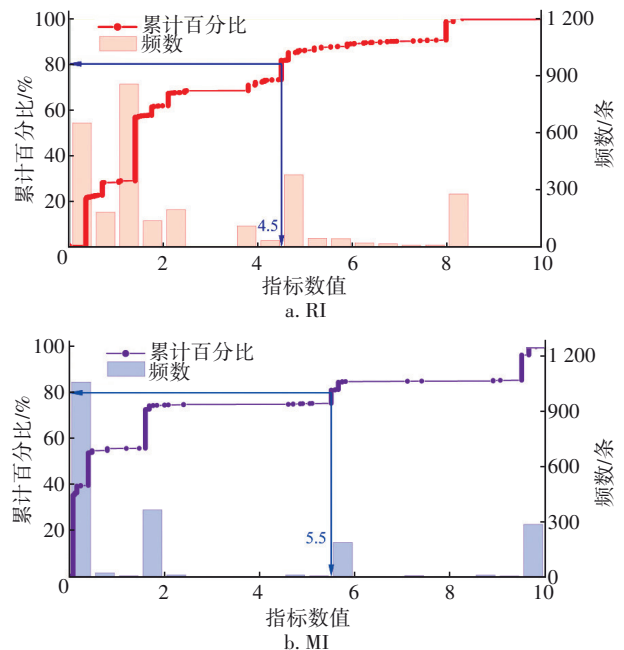
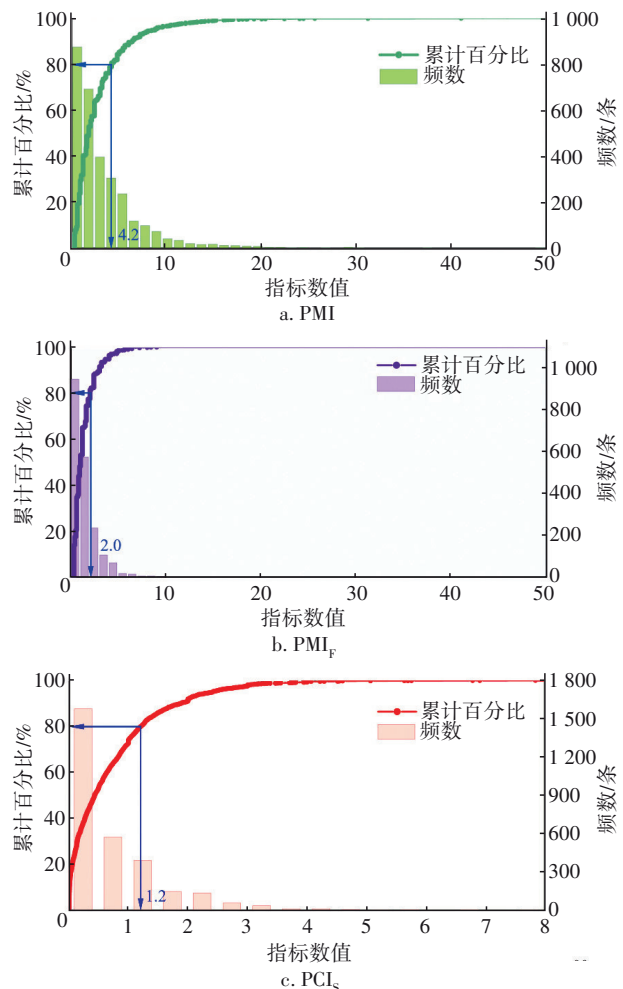


图 3 CJJ 181—2012 体系两种缺陷评分的累积分布特征
Fig.3 Cumulative distribution characteristics of two types of defect ratings under CJJ 181—2012 system

图 4 为自主构建双指标体系下结构性与功能性缺陷评分的分布特征,充分体现了连续量化逻辑在

结果表达上的优势。

从 PMI 的分布来看,大部分管段处于低值区域,如结构性缺陷评分(PMI_S)集中为 0~5,功能性缺陷评分(PMI_F)集中为 0~2。此外,还存在少量高值样本,其中 PMI_S 最高可达 40 以上。这表明该体系能够在保证整体平稳分布的同时,凸显少数极端严重缺陷,便于识别紧急修复目标。相比之下, PMI_F 的低值聚集更为明显,说明维护类缺陷虽广泛存在,但极少演变为大范围的高等级问题。从 PCI 的分布来看,结构性缺陷评分(PCI_S)高度集中于 0~2 区间,1.2 以下即可覆盖 80% 的管段,累积曲线在低值段快速上升,表明大部分管段的结构状态相对可控;功能性缺陷评分(PCI_F)在 1.4 以下的管段占比达 80%,高值段稀少。由累积曲线可知,双指标体系形成了连续、平滑的分布曲线,不存在明显的阶梯跳变。与传统等级化体系相比,该体系不仅能敏感捕捉缺陷的累积变化,还能区分高值极端个例与普通轻微缺陷。



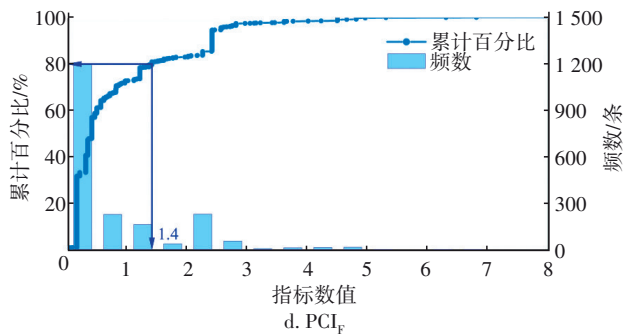


图4 双指标体系两种缺陷评分的累积分布特征

Fig.4 Cumulative distribution characteristics of two types of defect ratings under dual-index system

结合PMI与PCI的分布特征可知:PMI强调对个别严重缺陷的敏锐响应,便于定位急需修复的目标管段;PCI则可平滑刻画整体状况,更适用于趋势监测和长期资产管理。如当某管段PMI高而PCI低时,说明其总体状态尚可,但存在急需修复的单点缺陷;当两者同时较高时,则提示结构或功能状况整体恶化,需纳入更新规划。这种双指标体系既能支持不同管理需求,又能在决策中实现短期应急与长期规划的动态衔接。

4种评估方法在结构性和功能性缺陷评价中的统计特征分别见表1和表2。可知,不同体系在结果分布、离散性和极值处理上存在显著差异。在结构性缺陷评估中,WRC体系评分的均值与标准差远高于其他方法,最大值高达165.000,变异系数达222.666%,表明其评分跨度大,离散性较强,且分值设定具有一定主观性。相比之下,PACP体系评分与RI的均值处于2~3区间,分布相对集中;PCI_s的均值最低,说明其连续归一化计算模式有效压缩了数值区间,减少了极值效应。在功能性缺陷评估中,WRC体系评分呈现较高的均值与集中化特征,表明其评估结果几乎完全由最大分值主导。MI与PMI_F的离散性较强,变异系数分别约为141.0%和87.5%,反映出少数高值缺陷在部分管段上的累积放大作用,而PCI_F同样保持最低均值。

总体来看,WRC体系指标在两类缺陷评估中均呈现高度极端化;PACP体系指标和RI分布较集中;PMI和MI在部分样本中形成长尾分布;而PCI数值最为收敛。上述差异体现了不同评估体系在缺陷敏感性与连续化处理上的方法学差异。

表1 结构性缺陷评估指标的统计特征

Tab.1 Statistical characteristics of structural defect evaluation indices

评估方法、指标	均值	标准差	最小值	最大值	中位数	偏度	峰度	变异系数/%
WRC	18.331	40.816	0.100	165.000	2.000	2.733	6.556	222.666
PACP	2.138	1.013	1.000	5.000	2.000	0.866	0.451	47.371
RI	2.544	2.389	0.350	8.350	1.400	1.139	0.126	93.901
PMI _s	2.811	3.078	0.150	41.000	1.800	3.168	17.994	109.566
PCI _s	0.722	0.838	0.001	7.837	0.433	2.110	7.000	116.967

表2 功能性缺陷评估指标的统计特征

Tab.2 Statistical characteristics of functional defect evaluation indices

评估方法、指标	均值	标准差	最小值	最大值	中位数	偏度	峰度	变异系数/%
WRC	8.630	3.075	1.000	10.000	10.000	-1.936	1.898	35.628
PACP	1.913	1.146	1.000	5.000	1.000	1.052	0.014	59.905
MI	2.403	3.389	0.000	9.800	0.400	1.312	0.109	141.024
PMI _F	1.372	1.201	0.200	9.000	1.000	2.066	5.521	87.502
PCI _F	0.837	1.020	0.002	14.400	0.400	2.828	18.767	121.842

3 四种评估方法特性差异对比

由4种方法在结构性与功能性缺陷评价中的斯皮尔曼(Spearman)相关性可知,各方法之间多呈正相关,说明它们在健康状态的识别与排序上具有一定共性,均能反映缺陷严重程度的整体格局。在结构性缺陷评估中,PACP与WRC体系指标值的相关性最高($\rho=0.74$),反映出两者在方法设计上的继承

关系。相比之下,PCI_s与WRC、PACP体系指标值几乎不相关,表明双指标体系的连续化计算模式与传统分级体系的评价逻辑存在显著差异,双指标体系更倾向于平滑表达缺陷的累积效应。

在功能性缺陷中,WRC体系与其他3种方法的相关性极弱(除PMI_F外多数接近0)。这一现象主要源于WRC体系指标在功能性评价中将大量障碍物

类缺陷直接赋予最高等级,评估结果高度集中、缺乏区分度,因此在统计上表现出低相关性。除 WRC 体系外,其余方法之间相关性普遍较好。自主构建双指标体系与 PACP、CJJ 181—2012 体系均呈现中等~较高水平的正相关性,说明这些方法在功能性缺陷量化上共享了缺陷累积效应的刻画思路,并能较为一致地反映功能性退化趋势。

图 5 为 500 条示例管段的两类缺陷评估结果。

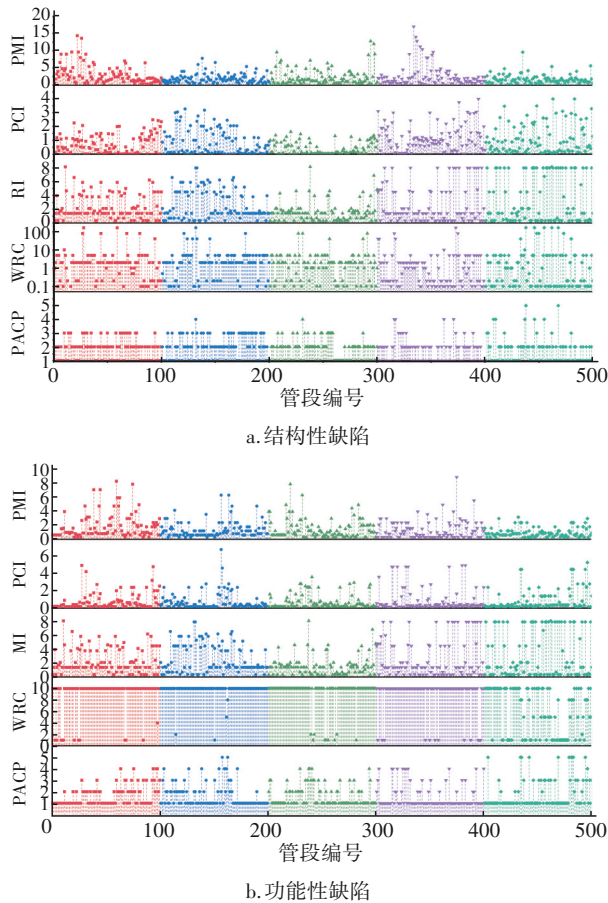


图 5 500 条示例管段的两类缺陷评估结果

Fig.5 Assessment results of two types of defects for 500 sample pipe segments

从结构性缺陷来看,PMI 与 PCI 作为连续变量,

表 3 4 种排水管道健康评估方法特征对比

Tab.3 Comparative characteristics of four drainage pipeline health assessment methods

评估方法	指标类型	结构性最小值	结构性最大值	功能性最小值	功能性最大值	数值类型	等级划分
WRC	单指标	0.1	165	1	10	离散	5 级
PACP	单指标	1	5	1	5	离散	5 级
CJJ 181—2012	单指标	0	10	0	10	离散	4 级
本文方法	双指标	0	∞	0	∞	连续	按需

由表 3 还可知,各评估方法在评分区间及分级方式上存在显著差异。如 WRC 体系的结构性指标

能够细致刻画各管段的健康状况,在多数管段上保持一致:当管段状况良好时,两者数值接近 0;当出现较严重缺陷时,两者同步升高,形成协同变化趋势。相比之下,CJJ 181—2012、WRC 和 PACP 体系采用离散型单指标评估方式,数值表现出明显的跳跃性和分段性。多条 PMI 差异数倍的管段,在这些方法中却被归为同一评分(如 RI 评分 1.4、PACP 体系评分 2 或 WRC 体系评分 90),压缩了有效分布空间,降低了对风险梯度的敏感度。值得注意的是,在少数高风险管段(如序号 438),4 种方法均给出一致的高分:PMI 升至 9.6、PCI 超过 2.8,RI 达到 8, WRC 体系为 165, PACP 体系评为最高等级 5,表明各体系在识别极端病害时仍具有高度一致性。

在功能性缺陷维度,PMI 在低分值管段中区分力较强,能够反映轻微问题之间的差异,并与 PCI 在高分段一致升高,体现双指标体系在严重缺陷识别上的一致性。MI 和 PACP 体系数值离散性较强,评分跳跃明显。因障碍物类缺陷比例高,故多条状态不同管段的 WRC 体系指标值呈现相同评分;这种设定有助于统一标准和保障可比性,但在特定缺陷类型集中时,表达粒度相对不足。

表 3 总结了 WRC、PACP、CJJ 181—2012 及自主构建的双指标体系在指标类型、取值范围及分级方式上的异同。可知,前 3 者均为单指标体系,输出结果为离散值,并以 4~5 级分级呈现。其中,WRC 体系在结构性缺陷评估中的数值范围最宽;PACP 和 CJJ 181—2012 体系的数值区间较窄,分级框架固定。相比之下,自主构建的双指标体系采用连续型数值,可根据应用情境(如地方财政、管理目标或风险容忍度)灵活设定等级数量及阈值,实现分级标准的适应性调整。这一差异不仅凸显了新体系在连续量化和管理适配性方面的优势,还为不同城市和场景下的决策提供了更高的灵活度和支撑能力。

最高值可达 165,而 PACP 体系的评分范围仅限于 1~5 级,导致不同方法间的数值基准无法直接对齐。

为此选取了20条具有代表性的管段进行数值归一化处理,将所有指标映射至0~1区间,便于观察各方法在同一缺陷情境下的评估表现与差异。

图6为20条典型管段同尺度评分对比。

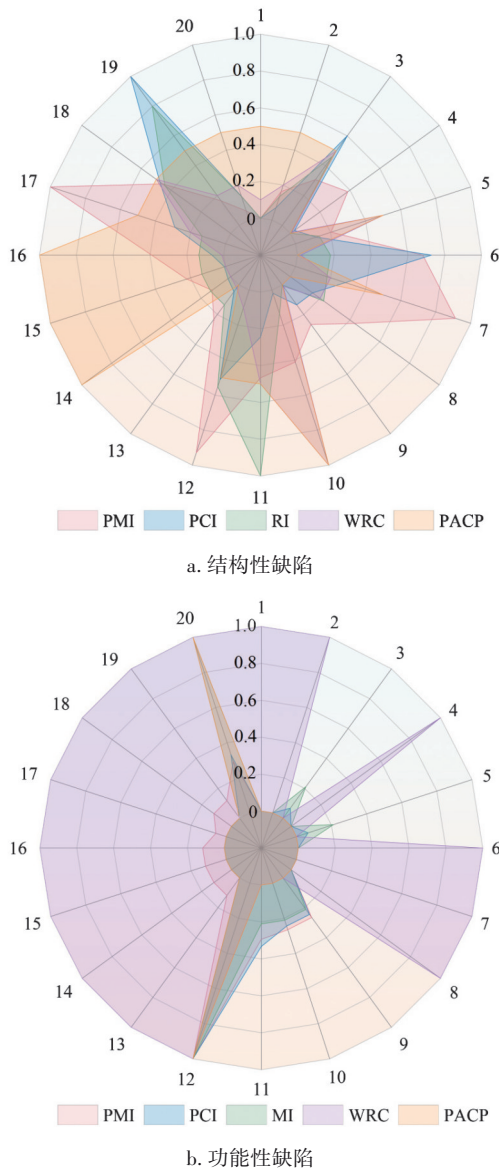


图6 20条典型管段同尺度评分对比

Fig.6 Comparison of scores on a unified scale for 20 representative pipe segments

在结构性维度中,PACP体系的评估结果最为离散,仅呈现0、0.5和1.0三个取值,显示出其强烈的分级特征。不同方法对缺陷最严重管段的判定并不一致:PACP体系得出第10条和第14~16条状况最差;PMI的最高值出现在第10和17条;PCI则在第19条达到峰值;而WRC体系仅将第10条评为最严重,其余管段分值相对较低。尽管存在差异,也

有部分管段结果趋于一致,例如第6和18条,各方法评估结果相对接近。在功能性维度中,各方法间表现出更高的一致性,尤其在第12和20条,所有方法均显示其功能状态明显恶化;而在第9~11条,4种方法一致评估为状态较好。值得注意的是,WRC体系对部分并不严重的管段给出了偏高评分,存在一定的高估倾向。总体而言,归一化处理后的结果清晰呈现了不同方法在评分模式上的差异,也突出了它们在特定管段上的一致判断。

4 健康状况等级分布与映射分析

在实际管理中,健康状况等级是运维决策和资源分配的直接依据。CJJ 181—202和WRC体系均基于固定阈值进行等级划分,PACP体系则以管段平均值直接对应等级,而自主构建的双指标体系因采用连续数值计算,并未预设固定的等级框架。

为便于不同方法之间的对比与分析,本研究首先依据各体系原有逻辑,确定了WRC、PACP和CJJ 181—2012体系的等级划分方式。对自主构建的PMI与PCI,则采用五分位法临时划分为5级,使每级管段数量大致接近20%;由于部分分位点存在相同数值,相同值被统一归入同一级别,因此各等级管段数量略有差异。

图7为4种方法的健康状况等级分布。可知,在结构性缺陷评估中,WRC体系数值的分布集中于1级(78%),其余等级均小于6%;PACP体系数值以中间等级(2~3级)为主,等级分布相对平缓;RI的整体分布更均衡,2级为占比最多的等级。在功能性缺陷评估中,WRC体系数值仍呈现极端集中特征,5级占比高达81%,而2~3级几乎缺失;PACP和CJJ 181—2012体系数值均主要聚集于1级,分布相对均衡,且PACP体系呈现逐级减少的趋势。

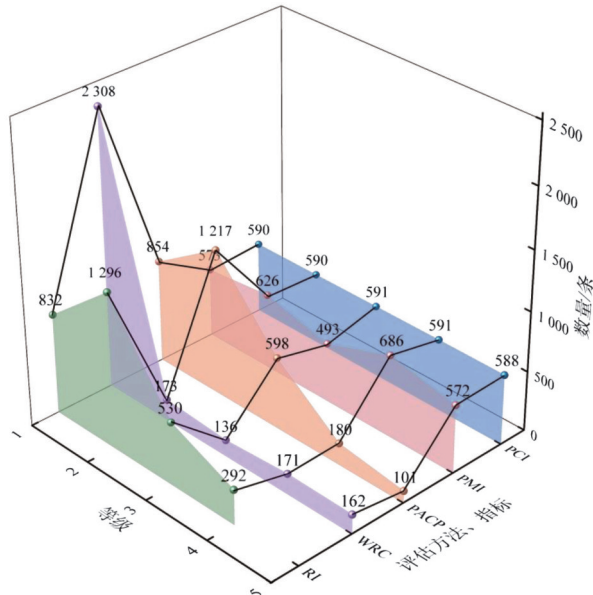
由3种基于固定阈值的方法在等级划分上的映射关系可知,在结构性缺陷评估中,CJJ 181—2012与PACP体系的等级对应性较高,1~2级呈稳定传递,但在3~4级发生明显交叉,说明两者在中等缺陷的划分标准上存在逻辑差异。WRC体系则呈现明显的两极化特征,78%的管段被归入1级,而2~5级数量稀少,且多来自PACP体系和RI指标的最高等级,导致中间等级几乎消失。在功能性缺陷评估中,差异更为突出。MI指标与PACP体系的等级在1~3级间传递相对平稳,而WRC体系的极端倾向被

进一步放大,81%的管段直接被评为5级,导致来自CJJ 181—2012和PACP体系的多等级结果几乎全部都被识别为最高等级,削弱了细分能力。

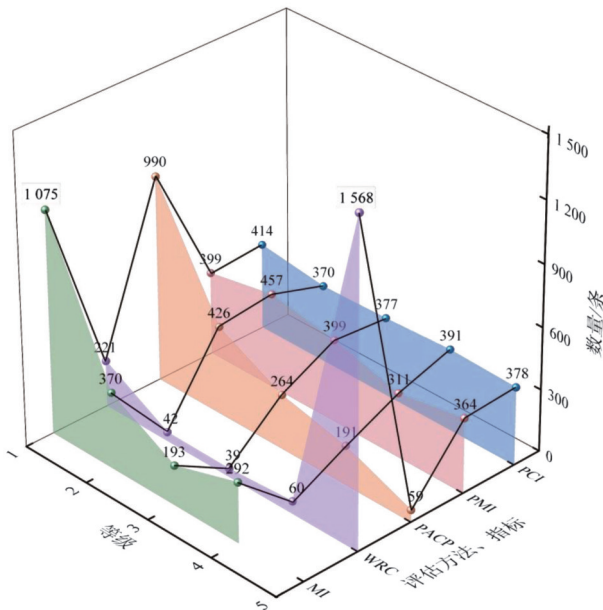
体工程需求、管理目标及应用场景合理选择评估方法,以确保评估结果的有效性和适用性。

② 3种主流方法在评估逻辑上各有侧重,也存在一定局限:WRC体系以最大缺陷驱动为核心,导致评估结果高度集中;PACP体系采用平均值逻辑,易稀释严重缺陷风险;CJJ 181—2012体系虽可整合多因子信息,但权重设置依赖主观经验,公式解释性有限,难以精确反映缺陷演化的连续性。

③ 自主构建的双指标体系以连续量化方法刻画缺陷,PMI强调急修需求,PCI反映整体状态,并可灵活设置等级数量与阈值,适应不同地区的管理策略和资源条件,具有较大的推广潜力。



a. 结构性缺陷



b. 功能性缺陷

图7 4种方法的健康状况等级分布

Fig.7 Health condition grade distribution of four evaluation methods

5 结论

① 4种排水管道健康评估方法在取值范围、指标类型、计算方式和等级划分上存在显著差异,形成了不同的评价框架。在实际应用中,应依据具

参考文献:

[1] 谷俊鹏, 曹玉梅, 潘铁津. 城市排水管网运维效能提升策略研究[J]. 中国给水排水, 2024, 40(16): 29-36.
 GU J P, CAO Y M, PAN T J. Research on strategy of improving the operation and maintenance efficiency of urban drainage pipeline network [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(16): 29-36 (in Chinese).
 [2] FARIS N, ZAYED T, AGHDAM E, et al. Real-time sanitary sewer blockage detection system using IoT[J]. Measurement, 2024, 226: 114146.
 [3] 杜预, 郭帅, 潘刚, 等. 国内外排水管道状况评估系统对比分析研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 9-15.
 DU Y, GUO S, PAN G, et al. Comparative analysis of pipelines condition assessment protocols at home and abroad[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 9-15 (in Chinese).
 [4] READ G F. Development of sewerage rehabilitation [M]//READ G F. Sewers. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004: 1-19.
 [5] GEMORA I. Pipeline assessment and certification program [C]//American Society of Civil Engineers. Proceedings of Pipeline Engineering and Construction International Conference 2003. Reston: American Society of Civil Engineers, 2003: 822-825.

作者简介:王万琼(1981—),女,湖北荆州人,硕士,高级工程师,主要从事排水管道工程研究。

E-mail:wang_wanqiong@ctg.com.cn

收稿日期:2025-08-05

修回日期:2025-10-26

(编辑:沈靖怡)